

Технічні науки

УДК 622.692.4

Середюк Марія Дмитрівна

доктор технічних наук,

професор кафедри газонафтопроводів та газонафтохранилищ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Середюк Мария Дмитриевна

доктор технических наук,

профессор кафедры газонефтепроводов и газонефтехранилищ

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

Serediuk Mariia

Doctor of Technical Sciences,

Professor of the Department of Oil and Gas Pipelines and Storages Facilities

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Григорський Станіслав Ярославович

кандидат технічних наук,

доцент кафедри газонафтопроводів та газонафтохранилищ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Григорский Станислав Ярославович

кандидат технических наук,

доцент кафедры газонефтепроводов и газонефтехранилищ

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

Grygorskyi Stanislav

PhD, Lecturer of the Department of

Oil and Gas Pipelines and Storages Facilities

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

**ГІДРОДИНАМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК НАФТОПРОВОДУ ПРИ
ТРАНСПОРТУВАННІ НАФТИ З НЕНЬЮТОНІВСЬКИМИ
ВЛАСТИВОСТЯМИ ЗА НИЗЬКИХ ШВИДКОСТЕЙ ЗСУВУ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НЕФТЕПРОВОДА ПРИ
ТРАНСПОРТИРОВАНИИ НЕФТИ С НЕНЬЮТОНОВСКИМИ
СВОЙСТВАМИ НА НИЗКИХ СКОРОСТЯХ СДВИГА
HYDRODYNAMIC CALCULATION OF OIL PIPELINE AT
TRANSPORTATION OIL WITH NON-NEWTONIAN PROPERTIES AT
LOW SHEAR RATES**

***Анотація.** Шляхом опрацювання експериментальних даних встановлено, що нафта долинських родовищ за температур до 30 °C та швидкостей зсуву до 200 с⁻¹ у процесі транспортування нафтопроводом характеризується властивостями нелінійнов'язкопластичної рідини. Запропоновано метод опрацювання кривих течії долинської для визначення коефіцієнтів реологічної моделі Балклі-Гершеля, одержано аналітичні залежності зазначених коефіцієнтів від температури долинської нафти. Розроблено спрощений метод гідродинамічного розрахунку нафтопроводу при перекачуванні долинської нафти при структурному режимі.*

***Ключові слова:** нелінійнов'язкопластична рідина, реологічна модель Балклі-Гершеля, критерій Іллюшина, крива течії, втрати тиску від тертя.*

***Аннотация.** В результате обработки экспериментальных данных установлено, что нефть долинских месторождений при температурах до 30 °C и скорости сдвига до 200 с⁻¹ в процессе перекачки нефтепроводом характеризуется свойствами нелинейновязкопластичной жидкости. Предложен метод обработки кривых течения долинской нефти для определения коэффициентов реологической модели Балкли-Гершеля, получены аналитические зависимости указанных коэффициентов от температуры. Разработан упрощенный метод гидродинамического*

расчета нефтепровода при перекачке долинской нефти при структурном режиме.

Ключевые слова: нелинейновязкопластичная жидкость, реологическая модель Балкли-Гершеля, критерий Ильюшина, кривая течения, потери давления от трения.

Summary. As a result of processing the experimental data, it was found that the oil of dolina fields at temperatures up to 30 °C and a shear rate of up to 200 s⁻¹ during pumping by an oil pipeline is characterized by the properties of a non-linear viscous-plastic fluid. A method was proposed for processing the flow curves of dolina oil to determine the coefficients of the Balkley-Herschel rheological model, and analytical dependences of these coefficients on temperature were obtained. A simplified method was been developed for the hydrodynamic calculation of an oil pipeline during the pumping of dolina oil at a structural regime.

Key words: nonlinear-viscoplastic fluid, Balkley-Herschel rheological model, Ilyushin criterion, flow curve, pressure loss from friction.

Вступ. У західному регіоні України видобувають високов'язку швидкозастигаючу нафту, яка характеризується аномальними реологічними властивостями. Транспортування зазначеної нафти нафтопроводом вимагає реалізації спеціальних технологій, що у свою чергу неможливо без попереднього встановлення реологічних характеристик нафти у робочому діапазоні швидкостей зсуву (градієнтів швидкості) та температур [1; 2].

Нами протягом двох останніх десятиліть здійснюється регулярний моніторинг реологічних характеристик нафти долинських родовищ шляхом проведення експериментальних досліджень на ротаційних віскозиметрах РЕОТЕСТ-2 і RHEOTEST RN4.1 та подальшого розроблення реологічних моделей. У результаті досліджень встановлено, що за температур, вищих за

30 °C, та швидкостей зсуву, більших за (100-200) s^{-1} , долинська нафта характеризується властивостями лінійної в'язкопластичної рідини і її крива течії може бути описана реологічною моделлю Шведова-Бінгама. Шляхом математичного моделювання кривих течії долинської нафти одержано коефіцієнти зазначеної моделі для робочих температур у широкому діапазоні швидкостей зсуву для незруйнованої та зруйнованої структури [2-6].

У той же час, у роботі [7] зазначено, що долинська нафта за низьких значень швидкості зсуву проявляє властивості нелінійнов'язкопластичної рідини. Однак у зазначеній роботі не визначено умови адекватності даної моделі і не розроблено метод опрацювання експериментальних даних реологічних властивостей долинської нафти з метою одержання коефіцієнтів моделі. Недостатньо розроблено інженерні методи гідродинамічного розрахунку нафтопроводу у разі перекачування нафти, що характеризується властивостями нелінійнов'язкопластичної рідини.

Мета дослідження. Розроблення спрощеного методу гідродинамічного розрахунку нафтопроводу у разі перекачування нафти, яка характеризується властивостями нелінійнов'язкопластичної рідини. Для реалізації мети необхідно вирішити такі завдання:

- визначити діапазони швидкостей зсуву та робочих температур, за яких долинська нафта проявляє властивості нелінійнов'язкопластичної рідини;
- запропонувати метод опрацювання кривих течії долинської для визначення коефіцієнтів реологічної моделі Балклі-Гершеля;
- одержати аналітичні залежності коефіцієнтів реологічної моделі Балклі-Гершеля від температури долинської нафти;
- розробити спрощений метод гідродинамічного розрахунку нафтопроводу при перекачуванні долинської нафти при структурному режимі.

Для опису кривої течії нелінійно-в'язкопластичної нафти зазвичай використовують реологічну модель Балклі-Гершеля [1]

$$\tau = \tau_o + k \cdot \gamma^n, \quad (1)$$

де τ_o – границя плинності середовища Балклі-Гершеля, Па;

k – характеристика консистентності рідини, Па·сⁿ;

$\gamma = du/dr$ – градієнт швидкості зсуву, с⁻¹;

n – коефіцієнт моделі, що враховує її нелінійний характер.

Для одержання математичних виразів, що дадуть змогу розрахувати коефіцієнти рівняння регресії (1) τ_o , k та n , застосовуємо метод найменших квадратів. Записуємо рівняння, яке необхідно дослідити на мінімум

$$F = \sum_{i=1}^m (\tau_o + k \cdot \gamma_i^n - \tau_i)^2, \quad (2)$$

де m – кількість вимірювань;

τ_i – експериментальне значення динамічного напруження зсуву, що відповідає швидкості зсуву γ_i (с⁻¹) для i -ого вимірювання, Па.

Знаходимо частинні похідні від виразу (2)

$$\frac{\partial F}{\partial \tau_o} = 2 \cdot \sum_{i=1}^m (\tau_o + k \cdot \gamma_i^n - \tau_i), \quad (3)$$

$$\frac{\partial F}{\partial k} = 2 \cdot \sum_{i=1}^m (\tau_o + k \cdot \gamma_i^n - \tau_i) \cdot \gamma_i^n, \quad (4)$$

$$\frac{\partial F}{\partial n} = 2 \cdot \sum_{i=1}^m (\tau_o + k \cdot \gamma_i^n - \tau_i) \cdot k \cdot \gamma_i^{n-1} \cdot \ln \gamma_i. \quad (5)$$

Прирівнюємо одержані похідні до нуля, в результаті одержуємо систему рівнянь для визначення коефіцієнтів регресійної моделі (1)

$$\begin{cases} \tau_o \cdot m + k \cdot \sum_{i=1}^m \gamma_i^n = \sum_{i=1}^m \tau_i, \\ \tau_o \cdot \sum_{i=1}^m \gamma_i^n + k \cdot \sum_{i=1}^m \gamma_i^{2 \cdot n} = \sum_{i=1}^m (\tau_i \cdot \gamma_i^n), \\ \tau_o \cdot \sum_{i=1}^m (\gamma_i^n \cdot \ln \gamma_i) + k \cdot \sum_{i=1}^m (\gamma_i^{2 \cdot n} \cdot \ln \gamma_i) = \sum_{i=1}^m (\tau_i \cdot \gamma_i^n \cdot \ln \gamma_i). \end{cases} \quad (6)$$

Для перевірки адекватності отриманої математичної моделі обчислюємо такі параметри:

- відносне відхилення регресійної моделі (1) від експериментальних значень динамічного напруження зсуву,

$$\delta \tau_i = \frac{\tau_i - \tau_{m_i}}{\tau_i} \cdot 100 \%, \quad (7)$$

де τ_{m_i} – динамічне напруження зсуву, розраховане за формулою (1) для i -ого вимірювання, Па;

- коефіцієнт детермінації,

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (\tau_i - \tau_{m_i})^2}{\sum_{i=1}^m (\tau_i - \tau_{cp})^2}, \quad (8)$$

τ_{cp} – середнє значення динамічного напруження зсуву для всієї серії випробувань, Па,

$$\tau_{cp} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \tau_i. \quad (9)$$

Описаний вище обчислювальний алгоритм реалізовано у комп'ютерній програмі, яка дає можливість визначити коефіцієнти реологічної моделі Балклі-Гершеля за результатами дослідження реологічних характеристик нафти на ротаційному віскозиметрі.

Визначимо можливий діапазон зміни швидкості зсуву у процесі трубопровідного транспортування долинської нафти. Знаходимо максимальне значення швидкості зсуву на стінці труби за формулою

$$\tau_{cm_{\max}} = \frac{\Delta P \cdot D}{4 \cdot L}, \quad (10)$$

де ΔP – максимально допустимий перепад тиску при перекачуванні нафти в нафтопроводі;

D – внутрішній діаметр нафтопроводу;

L – довжина ділянки нафтопроводу.

Після підстановки у формулу (10) параметрів вітчизняного нафтопроводу, яким транспортують високов'язку швидкозастигаючу долинську нафту, одержимо

$$\tau_{cm_{\max}} = 5 \text{ Па}.$$

Формулу (1) розв'язуємо відносно швидкості зсуву

$$\gamma = \left(\frac{\tau_{cm_{\max}} - \tau_o}{k} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (11)$$

Підставляючи у формулу (11) результати опрацювання кривих течії долинської нафти за різних робочих температур, знаходимо діапазон швидкостей зсуву, які відповідають структурному режиму руху у нафтопроводі

$$\gamma \leq 200 \text{ с}^{-1}.$$

Згідно з [8] швидкості зсуву, розраховані для структурного режиму руху нелінійнов'язкопластичної нафти не можуть бути перевищені при турбулентному режимі її руху у нафтопроводі.

Таким чином, реологічну модель Балклі-Гершеля для опису поведінки долинської нафти у процесі перекачування нафтопроводом доцільно використовувати за швидкостей зсуву, менших за 200 с^{-1} . Враховуючи стандартні значення швидкості зсуву для віскозиметра РЕОТЕСТ-2, для опрацювання вибрано діапазон швидкостей зсуву від 3 с^{-1} до 243 с^{-1} .

Опрацювання результатів реологічних досліджень долинської нафти у діапазоні швидкостей зсуву від 3 с^{-1} до 243 с^{-1} за наведеним вище

алгоритмом, дало можливість визначити числові значення коефіцієнтів моделі Балклі-Гершеля для температур від 0 °C до 30 °C. Одержані результати ілюструють рисунки 1-3.

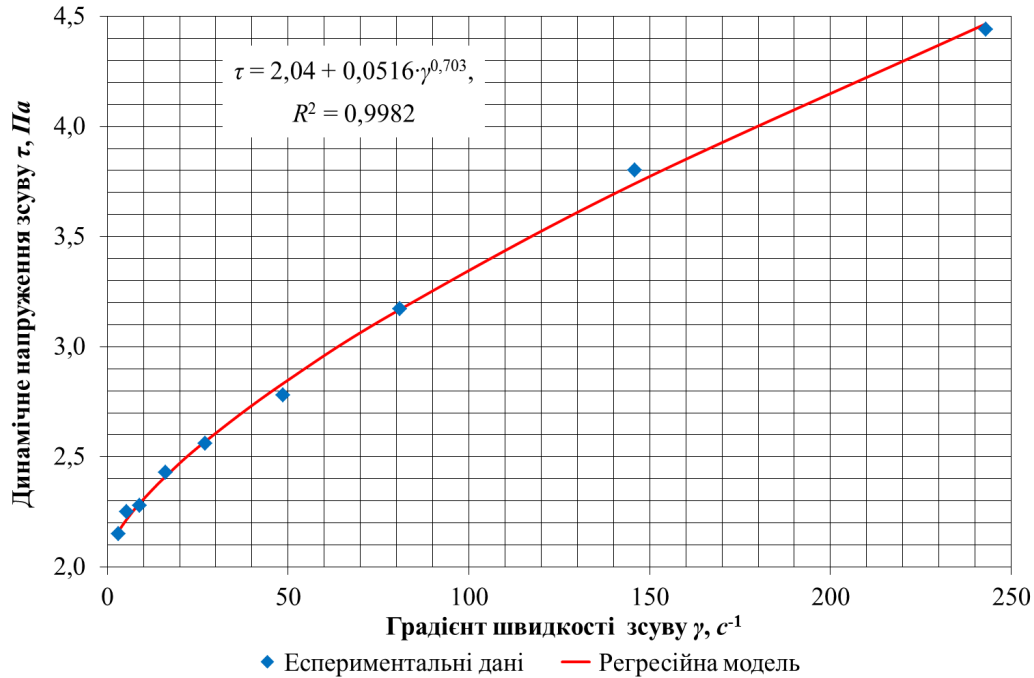


Рис. 1. Залежність зміни динамічного напруження зсуву від градiєнта швидкості зсуву для долинської нафти за температури 30 °C

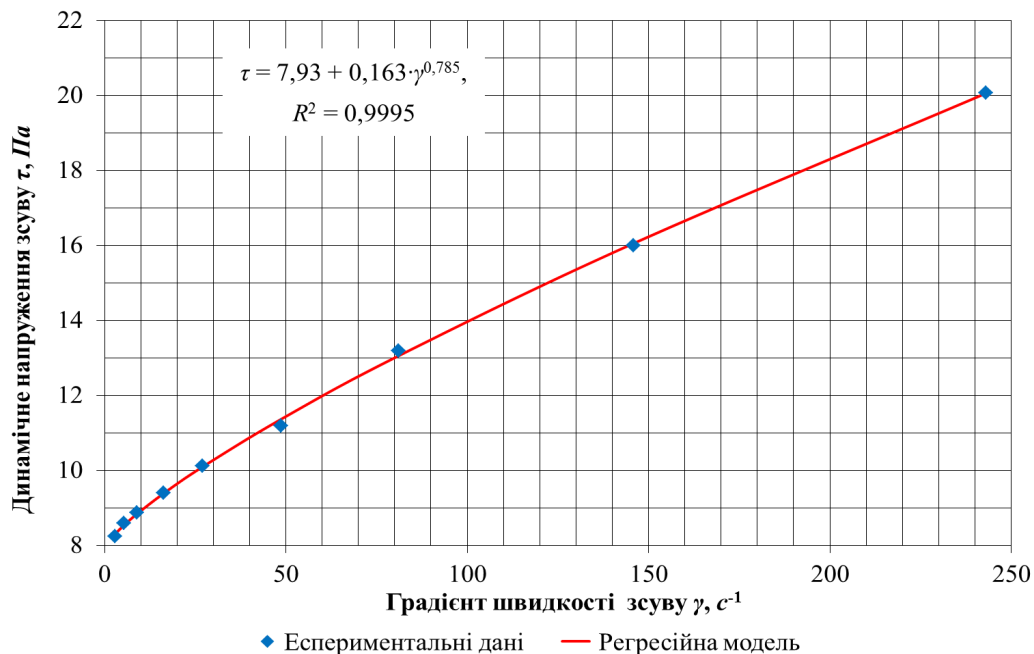


Рис. 2. Залежність зміни динамічного напруження зсуву від градiєнта швидкості зсуву для долинської нафти за температури 15 °C

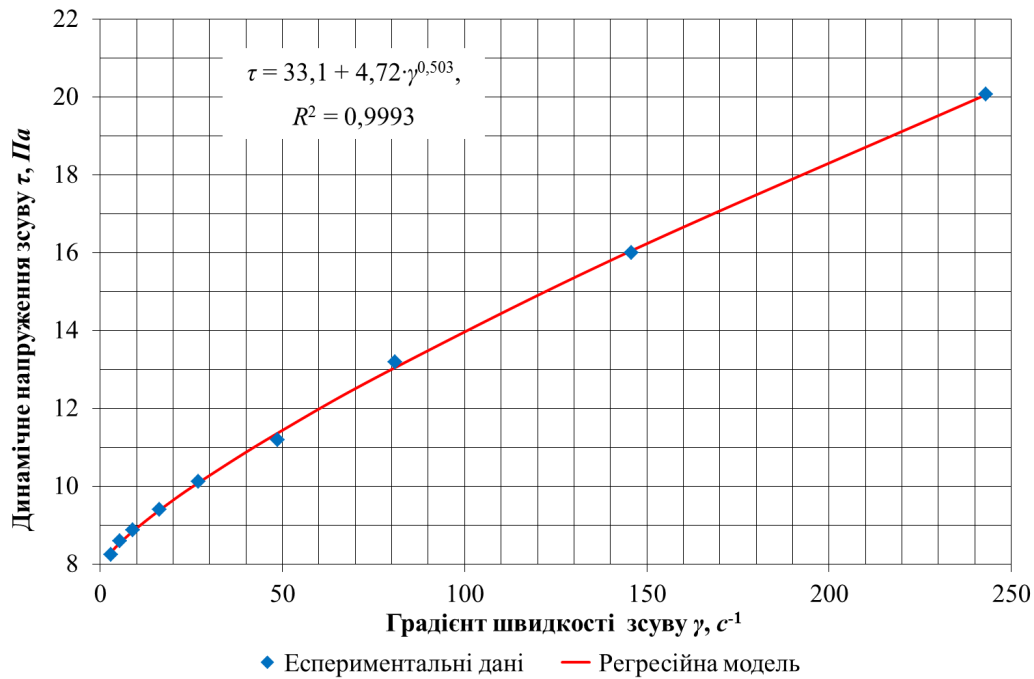


Рис. 3. Залежність зміни динамічного напруження зсуву від градiєнта швидкості зсуву для долинської нафти за температури 0 °C

Аналіз рисунків 1-3 підтверджує той факт, що у діапазоні низьких швидкостей зсуву до 200 c^{-1} і робочих температур до $30 \text{ }^\circ\text{C}$ рух долинської нафти у нафтопроводі адекватно може бути описаний реологічною моделлю Балклі-Гершеля. Для всієї серії експериментів коефіцієнт детермінації моделей не нижчий за значення 0,998.

Таким чином, за результатами математичного моделювання нами одержані числові значення реологічної моделі Балклі-Гершеля для семи значень температур долинської нафти у діапазоні від $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для проведення гідродинамічних розрахунків нафтопроводу у разі транспортування нафти, що характеризується властивостями нелінійно-в'язкопластичної рідини, необхідно визначати числові значення коефіцієнтів моделі Балклі-Гершеля для довільного значення робочої температури у зазначеному діапазоні.

Тому будемо графічні залежності коефіцієнтів моделі Балклі-Гершеля від робочої температури долинської нафти. Виконуємо їх

математичне моделювання, використовуючи засоби Microsoft Excel. У результаті одержуємо такі аналітичні вирази:

- залежність границі плинності середовища Балклі-Гершеля τ_o (Па) від температури долинської нафти t ($^{\circ}\text{C}$)

$$\tau_o = 2,047 \cdot 10^{-4} \cdot t^4 - 1,461 \cdot 10^{-2} \cdot t^3 + 0,3779 \cdot t^2 - 4,755 \cdot t + 33,24; \quad (12)$$

- залежність характеристики консистентності рідини k (Па $\cdot\text{c}^n$) від температури долинської нафти t

$$k = 6,083 \cdot 10^{-6} \cdot t^4 - 7,858 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 + 3,550 \cdot 10^{-2} \cdot t^2 - 0,6747 \cdot t + 4,632; \quad (13)$$

- залежність коефіцієнта математичної моделі n від температури долинської нафти t

$$n = 9,712 \cdot 10^{-8} \cdot t^4 - 7,718 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 + 2,479 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 - 9,818 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,5067. \quad (14)$$

Гідродинамічний розрахунок нафтопроводу передбачає наявність аналітичної залежності між витратою нафти та втратами тиску на її транспортування. У разі перекачування нафтопроводом ньютонівської рідини такими загальноприйнятими залежностями є формула Пуазейля для ламінарного режиму і формула Лейбензона для турбулентного режиму. У разі перекачування нелінійно-в'язкопластичної рідини у нафтопроводі формула для об'ємної витрати має вигляд [7]

$$Q = \frac{\pi \cdot n \cdot D^3}{8 \cdot (n+1) \cdot \tau_{cm} \cdot k^{\frac{1}{n}}} \cdot (\tau_{cm} - \tau_o)^{\frac{n+1}{n}} + \frac{\pi \cdot n^2 \cdot D^3}{4 \cdot (n+1) \cdot (2 \cdot n+1) \cdot \tau_{cm}^2 \cdot k^{\frac{1}{n}}} \times \\ \times \left[\frac{n}{(3 \cdot n+1) \cdot \tau_{cm}} \cdot (\tau_{cm} - \tau_o)^{\frac{3 \cdot n+1}{n}} - (\tau_{cm} - \tau_o)^{\frac{2 \cdot n+1}{n}} \right]. \quad (15)$$

Аналітичний вираз (15) є трансцендентним рівнянням, яке неможливо розв'язати в явному вигляді відносно втрат тиску від тертя залежно від величини витрати нафти у нафтопроводі.

Розробимо метод апроксимації рівняння руху нелінійно-в'язкопластичної рідини у трубопроводі (15) з урахуванням технології трубопровідного транспортування долинської нафти. Для цього

створимо обчислювальний алгоритм та комп'ютерну програму, виконаємо багатоваріантні гідродинамічні розрахунки модельного нафтопроводу, за результатами яких одержимо математичні моделі. Насамперед визначаємо діапазон допустимих тисків і витрат нафти у нафтопроводі. Задаємо значення годинної витрати нафти $Q_{год}$ і обчислюємо секундну об'ємну витрату Q у нафтопроводі.

Обчислювальний алгоритм передбачає ітерації за втратами тиску від тертя у трубопроводі. Спочатку визначаємо втрати тиску, що відповідають початку руху нелінійно-в'язкопластичної рідини з діаметром ядра, рівним внутрішньому діаметру нафтопроводу

$$P_o = \frac{4 \cdot L \cdot \tau_o}{D}. \quad (16)$$

Приймаємо втрати тиску від тертя у нафтопроводі, рівними зазначеному вище

$$P = P_o. \quad (17)$$

Збільшуємо втрати тиску із вибраним кроком δP

$$P = P + \delta P. \quad (18)$$

Знаходимо діаметр ядра нелінійної в'язкопластичної рідини при втратах тиску від тертя у трубопроводі P

$$D_{\text{я}} = \frac{4 \cdot L \cdot \tau_o}{P}. \quad (19)$$

Визначаємо динамічні напруження зсуву на стінці нафтопроводу за втрат тиску P

$$\tau_{cm} = \frac{P \cdot D}{4 \cdot L}. \quad (20)$$

Обчислюємо праву частину рівняння (15) за знайденим значенням динамічних напружень на стінці труби, яку позначимо $F(P)$.

Якщо виконується умова

$$Q > F(P), \quad (21)$$

то розрахунок повторюємо, розпочинаючи з формули (18) до зміни знаку у формулі (21).

У результаті знаходимо втрати тиску від тертя у нафтопроводі P , що відповідають заданій витраті нелінійнов'язкопластичної рідини Q .

Вводимо коефіцієнт χ , який характеризує збільшення втрат тиску від тертя внаслідок зменшення радіуса ядра нелінійнов'язкопластичної рідини у нафтопроводі

$$\chi = \frac{P}{P_o}. \quad (22)$$

Відповідно до робіт [9, 10], втрати тиску від тертя при русі у трубопроводі нафти, яка проявляє властивості нелінійнов'язкопластичної рідини, можна виразити функцією критерію Іллюшина

$$I = \frac{8 \cdot \pi^n \cdot \tau_o \cdot D^{3 \cdot n}}{4^n \cdot k \cdot Q^n \cdot \left(\frac{6 \cdot n + 2}{n} \right)^n}. \quad (23)$$

Метод послідовних наближень, охарактеризований формулами (15)-(23), реалізовано у комп'ютерній програмі. За програмою виконані багатоваріантні гідродинамічні розрахунки модельного трубопроводу, параметри якого близькі до характеристик вітчизняного нафтопроводу.

Опрацювання результатів розрахунків методами математичного моделювання дало змогу одержати такі залежності коефіцієнта збільшення втрат тиску від тертя χ від критерію Іллюшина I і параметра n реологічної моделі Балклі-Гершеля

$$\chi = \frac{A_n}{I^2} + \frac{B_n}{I} + C_n, \quad (24)$$

де A_n, B_n, C_n – коефіцієнти математичної моделі, значення яких залежать від параметра n ,

$$A_n = 5,660 \cdot n^4 + 16,32 \cdot n^3 - 70,56 \cdot n^2 + 70,78 \cdot n - 22,41, \quad (25)$$

$$B_n = -20,74 \cdot n^4 + 59,11 \cdot n^3 - 56,88 \cdot n^2 + 19,02 \cdot n + 7,830, \quad (26)$$

$$C_n = 0,4636 \cdot n^4 + 1,663 \cdot n^3 + 1,953 \cdot n^2 - 0,5985 \cdot n + 1,084. \quad (27)$$

Покажемо приклад застосування запропонованого методу гідродинамічного розрахунку для умов перекачування нафтопроводом долиньської нафти. Використовуючи результати опрацювання кривої течії долиньської нафти, формуємо початкові дані:

$$L = 50000 \text{ км}; D = 0,256 \text{ м}; Q = 150 \text{ м}^3/\text{год} = 4,17 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\tau_o = 2,41 \text{ Па}; k = 0,039 \text{ Па} \cdot \text{с}^n; n = 0,826.$$

Використовуючи комп'ютерну програму, визначаємо гідродинамічні параметри руху долиньської нафти у нафтопроводі

$$P_o = 1,883 \text{ МПа}; H = 32,85; \chi = 1,445; P = 2,721 \text{ МПа}.$$

Виконуємо аналогічні розрахунки, застосовуючи формули (24)-(27):

$$A_n = 5,660 \cdot 0,826^4 + 16,32 \cdot 0,826^3 - 70,56 \cdot 0,826^2 + 70,78 \cdot 0,826 - 22,41 = -0,2551;$$

$$B_n = -20,74 \cdot 0,826^4 + 59,11 \cdot 0,826^3 - 56,88 \cdot 0,826^2 + 19,02 \cdot 0,826 + 7,830 = 8,390;$$

$$C_n = 0,4636 \cdot 0,826^4 + 1,663 \cdot 0,826^3 + 1,953 \cdot 0,826^2 - 0,5985 \cdot 0,826 + 1,084 = 1,201;$$

$$\chi = \frac{-0,2551}{32,85^2} + \frac{8,390}{32,85} + 1,201 = 1,456.$$

Втрати тиску від тертя у нафтопроводі дорівнюють

$$P = 1,883 \cdot 1,456 = 2,741 \text{ МПа}.$$

Відносна різниця результатів гідродинамічних розрахунків нафтопроводу за математичними моделями і комп'ютерною програмою у даному випадку менша ніж 1 %, що засвідчує її адекватність і можливість практичного застосування.

Висновки.

1. Розроблені алгоритм і комп'ютерна програма для визначення коефіцієнтів реологічної моделі Балклі-Гершеля за результатами експериментальних дослідження реологічних характеристик нафти на ротаційному віскозиметрі.

2. Встановлено, що реологічну модель Балклі-Гершеля для опису поведінки долинської нафти у процесі її транспортування нафтопроводом доцільно використовувати для робочих температур від 0°C до 30°C за швидкостей зсуву, менших за 200 c^{-1} . Для всієї серії реологічних експериментів з долинською нафтою коефіцієнт детермінації розроблених математичних моделей не нижчий за значення 0,99.

3. Для обчислення значень коефіцієнтів реологічної моделі Балклі-Гершеля за довільної робочої температури доцільно використовувати поліноміальні залежності, одержані шляхом опрацювання даних експериментів методом, викладеним вище.

4. Метод апроксимації рівняння руху нелінійнов’язкопластичної рідини у трубопроводі, запропонований у роботі, ураховує технологію трубопровідного транспортування долинської нафти і дає змогу з максимальною похибкою до 5 % без застосування ітерацій визначити втрати тиску від тертя за відомих значень витрати нафти і коефіцієнтів реологічної моделі Балклі-Гершеля.

Література

1. Середюк М. Д., Пилипів Л. Д. Трубопровідний транспорт високов’язких вуглеводнів. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. 317 с.
2. Середюк М. Д., Болонний В. Т. Методика теплогідравлічного розрахунку неізотермічного нафтопроводу з врахуванням неньютонівських властивостей нафти // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. 2003. №2 (7). С. 59-64.
3. Пилипів Л. Д., Середюк М. Д. Експериментальні дослідження реологічних характеристик долинської нафти з додаванням депресатора // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2006. № 3 (20). С. 66-72.

4. Пилипів Л. Д., Середюк М. Д. Особливості гідравлічного розрахунку нафтопроводу при перекачуванні в'язкопластичної нафти // Нафтогазова енергетика. 2007, № 1 (2). С. 27-30.
5. Середюк М. Д., Яновський С. Р. Гідравлічний розрахунок нафтопроводу при перекачуванні нафти, що характеризується властивостями в'язкопластичної рідини // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2008. № 2 (27). С. 56-61.
6. Яновський С. Р., Середюк М. Д. Метод прогнозування режимних параметрів роботи нафтопроводу при перекачуванні в'язкопластичної рідини // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2009. № 1 (30). С. 74-78.
7. Яновський С. Р. Середюк М. Д. Особливості гідравлічного розрахунку нафтопроводу, що транспортує нелінійнов'язкопластичну рідину // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2009. № 2(20). С. 89.
8. Пиядин М. Н. Оценка области определения реологических параметров неньютоновских нефтей применительно к их транспорту по магистральным трубопроводам // Технология перекачки нефти, предотвращения потерь, автоматизированная система управления трубопроводным транспортом. 1985. Уфа: ВНИИСПТнефть. С. 31-34.
9. Губин В. Е., Губин В. В. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. М.: Наука, 1982. 293 с.
10. Лурье М. В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа / М. В. Лурье. М.: Нефть и газ, 2003. 336 с.